"نشریه علوم زراعی ایران"
جلد بیست و پنجم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.23223243.2021.19.1.29.0

اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد دانه کلزا (*Brassica napus* L.) در دشت دهگلان استان کردستان با استفاده از برنامه DSSAT

Effect of climate change on growth and seed yield of canola (*Brassica napus* L.) in Dehgolan plain of Kurdistan province in Iran-using the DSSAT program

بهروز دولت‌پرست[1]، فرزاد حسین‌پناهی[2]، حامد منصوری[3] و عادل سی و سه مرده[4]

چکیده

دولت‌پرست، ب.، ف. حسین‌پناهی، ح. منصوری و ع. سی و سه مرده. ۱۴۰۲. اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد دانه کلزا (*Brassica napus* L.) در دشت دهگلان استان‌کردستان با استفاده از برنامه DSSAT. **نشریه علوم زراعی ایران. ۲۵ (۲): ۱۱۸ -۱۰۱.**

مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهی یکی از پیشرفته‌ترین ابزارهایی است که امروزه به‌منظور برآورد عملکرد و بهینه کردن عملیات زراعی استفاده می‌شوند. به‌منظور ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد دانه کلزا در دشت دهگلان استان کردستان از مدل CSM-CROPGRO-Canola برای شبیه‌سازی پاسخ گیاه به تغییرات آب و هوایی در سه سناریو (RCP2.6، RCP4.6 و RCP8.5) در چهار دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ در برنامه DSSAT استفاده شد. به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل از آزمایشات مزرعه‌ای انجام شده در سال‌های زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ استفاده شد. نتایج اعتبار سنجی مدل آب و هوایی و گیاهی بر اساس شاخص‌های ارزیابی مدل نشان داد که مدل دارای دقت کافی برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی و خصوصیات رشدی گیاه کلزا بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که خصوصیات رشدی گیاه کلزا تحت تاثیر اثر منفی تغییر اقلیم در هر سه سناریو در دوره‌های زمانی مختلف قرار گرفت، به‌طوریکه صفات شاخص سطح برگ، عملکرد زیستی، شاخص برداشت و عملکرد دانه در سناریوهای تغییر اقلیم نسبت به سال زراعی مبنا (۹۸-۱۳۹۷) کاهش نشان دادند. کمترین و بیشترین کاهش عملکرد دانه نسبت به عملکرد سال پایه (۵۳۰۹ کیلوگرم در هکتار) به ترتیب در سناریوی RCP2.6 در دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ (۵۲۹۳ کیلوگرم در هکتار) با ۰/۳- درصد و سناریوی RCP8.5 در دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ (۳۳۱۳ کیلوگرم در هکتار) با ۳۷/۵۸- درصد مشاهده شد. ارزیابی مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده عملکرد دانه، عملکرد زیستی، شاخص برداشت و حداکثر شاخص سطح برگ بر اساس شاخص RMSE% به‌ترتیب ۱۱/۸، ۱۰/۱۲، ۸/۶٤ و ۱۳/۳ بود. نتایج نشان داد که بیشترین اثر منفی تغییر اقلیم بر گیاه کلزا در سناریوی RCP8.5 و کمترین اثر منفی در سناریوی RCP2.6 بوده و با گذشت زمان اثر منفی تغییر اقلیم، به‌ویژه در سناریوی RCP8.5 تشدید یافت. بر اساس نتایج این تحقیق به‌منظور کاهش اثر منفی تغییر اقلیم در آینده، راهکارهایی مانند بهبود عملیات به‌زراعی، به‌نژادی، کارایی مصرف آب و نیتروژن برای تولید کلزا در شرایط تغییر اقلیم ضروری است.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، شبیه‌سازی، ضرایب ژنتیکی، کلزا و مدل‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰ این مقاله مستخرج از رساله دکتری نگارنده اول می‌باشد

۱- دانشجوی دکتری دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲- استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان، سنندج، ایران (مکاتبه‌کننده) (پست الکترونیک: f.hosseinpanahi@uok.ac.ir)
۳- استادیار بخش تحقیقات چغندر قند، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران
۴- دانشیار دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان، سنندج ، ایران

Effect of climate change on growth and seed yield of canola (*Brassica napus* L.) in Dehgolan plain of Kurdistan province in Iran-using the DSSAT program

Dolatparast, B.[1], F. Hosseinpanahi [2], H. Mansouri [3], A. Siosemardeh [4]

ABSTRACT

Dolatparast, B., F. Hosseinpanahi, H. Mansouri, A. Siosemardeh. 2023. Effect of climate change on growth and seed yield of canola (*Brassica napus* L.) in Dehgolan plain of Kurdistan province in Iran-using the DSSAT program**. Iranian Journal of Crop Sciences. 25(1): 101-118. (In Persian).**

Introduction: The crisis of water sources limitation has signified the necessity of irrigation management of canola crop unavoidable. This issue is especially critical in the context of climate change, which is accompanied by changes in precipitation amount and patterns as well astemperature flucatations. The time-consuming and costly nature of field research and the spatial and temporal dependence of the results have caused crop growth modelling to be considered as an effective and acceptable technique in decision support systems under climate change conditions. In this regard, the DSSAT program is one of the most successful programs available for simulating the growth and development of crops. In this study simulation program for plant growth and development was used to predict growth and seed yield of canola in Dehgolan in Kurdistan province of Iran.

Materials and Methods: This study consisted of two phases; field and simulation studies. Statistical Downscaling Model (SDSM) was used to simulate climate data and forecast climate changes in the future. For the future climate, the set of CanESM scenarios including; RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, presented by the Canadian Earth System Modeling Center, were used. Then, the changes in the growth and yield of canola under the mentioned scenarios were studied in the four periods of 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, and 2081-2100 using the CSM-CROPGRO-Canola model in the DSSAT program. In field studies, two field experiments were carried out to calibrate and validate the output of the model in the research farm of the Kurdistan University in Dehgolan 2016-2017 and 2017-2018 cropping seasons.

Results: The results of validation for weather and growth models showed that the models had sufficient accuracy to simulate climate variables and also the growth of canola. The simulation results illustrated that the growth characteristics of canola were affected by the negative effects of climate change under all scenarios and different time periods, therefore, the plant traits in various climate change scenarios were low when compared to the baseline cropping season (2018-2019). In general, the results of the model showed that the maximum negative effects of climate change on canola growth was in the RCP8.5 scenario and the minimum in the RCP2.6 scenario. The adverse effects of climate change were accelerated by time, especially in the RCP8.5 scenario.

Conclusion: The results of this study showed that the future climate change will have a negative effect on the growth and yield of canola that depends on the scenario and time period, the seed yield will decrease from 0.3% to 37.58% as compared with the current conditions. Therefore, to mitigate climate change impact on agricultural ecosystems necessary management measures including development of suitable canola cultivars and agronomic mangament package should be taken into consideration for adaptation to the changing climate in future.

Key words: Canola, Climate change, Genetic coefficients, Modelling and Simulation

Received: March, 2023 **Accepted: August, 2023**

1. PhD Student, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
2. Assistant Prof., University of Kurdistan, Sanandaj, Iran (Corresponding author) (Email: f.hosseinpanahi@uok.ac.ir)
3. Assistant Prof., Sugar Beet Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Hamedan, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Hamedan, Iran
4. Associate Prof., University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

مقدمه

کلزا پس از سویا و نخل روغنی، سومین منبع تأمین روغن نباتی در جهان است (Thomas *et al*., 2016). در دو دهه اخیر (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ میلادی) سطح زیر کشت، تولید و عملکرد کلزا در جهان روند رو به رشد داشته و سطح زیر کشت آن از ۲۵/۸ میلیون هکتار به ۳۵/۵ میلیون هکتار (۳۷ درصد افزایش)، عملکرد آن از ۱/۵۲ تن در هکتار به ۲/۰۳ تن در هکتار (۳۳ درصد افزایش) و تولید آن از ۳۹/۵ میلیون تن به ۷۲/۴ میلیون تن (۸۳ درصد افزایش) رسیده است. در سال ۲۰۲۰ قاره آسیا با ۴۳/۳ درصد رتبه اول سطح زیر کشت کلزا را به خود اختصاص داد (FAO, 2021) و در ایران برنامه‌ریزی زیادی برای توسعه زراعت کلزا تدارک دیده شد. در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ سطح زیرکشت کلزا در ایران از ۹۳۲۰ هکتار به ۱۸۳۶۹۳ هکتار (مجموع آبی و دیم)، عملکرد دانه از ۹۴۴ کیلوگرم در هکتار به ۱۹۳۲ کیلوگرم در هکتار (آبی) و تولید آن از ۸۷۹۳ تن به ۳۳۳۷۷۹ تن (آبی و دیم) افزایش یافت (Anonymous, 2022).

لزوم توجه به خودکفایی در تولید دانه‌های روغنی در کنار مزایای زراعی ارزشمند گیاه کلزا باعث توجه به توسعه زراعت این گیاه در کشور شده است، لیکن محدودیت روزافزون منابع آب، ضرورت مدیریت آبیاری این گیاه را بیش از پیش آشکار می‌سازد. این موضوع به‌خصوص در شرایط تغییر اقلیم که همراه با تغییر در الگوهای بارش و دما است، بسیار بحرانی است. در سال‌های اخیر توجه به رویدادهایی مانند خشکسالی، سیل و موج‌های شدید گرما، نه تنها بخاطر پیامدهای اقتصادی و اجتماعی آنها، بلکه به منزله نشانگرهای تغییر اقلیم، اهمیت زیادی یافته است. پدیده تغییراقلیم باعث شده است که استفاده از نتایج تحقیقات گذشته برای برنامه‌ریزی‌های آینده با یک چالش بزرگ مواجه شود. افزایش دمای جهانی، همراه با افزایش تقاضا برای غذا، می‌تواند باعث کاهش دسترسی جهانی به غذا شود (IPCC, 2021). تغییرات آب و هوایی بر امنیت جهانی غذا و آب تأثیر گذاشته و این موضوع در کشور ایران باعث خواهد شد تا سال ۲۰۵۰ تعداد پهنه‌های اقلیمی کشاورزی موجود از ۱۲ ناحیه به ۹ ناحیه کاهش یابد که باعث به مخاطره افتادن تولید و تنوع محصولات کشاورزی خواهد شد (Koocheki and Kamali, 2010).

از دو دهه آخر قرن بیستم تاکنون تغییر اقلیم به یکی از مهم‌ترین چالش‌ها تبدیل شده و تلاش‌های هماهنگ برای کاهش آسیب‌پذیری کشاورزی در برابر آثار منفی تغییرات آب و هوا و انعطاف‌پذیری بیشتر آن مورد نیاز است. در پنجمین گزارش ارزیابی مجمع بین دول تغییر اقلیم، سناریوهای جدیدی موسوم به RCP (Representative Concentarion Pathways) با عناوین RCP۲/۶، RCP۴/۶، RCP۶ و RCP۸/۵ که بر اساس میزان تابش (وات بر مترمربع) نام‌گذاری شده‌اند، ارائه شد (IPCC, 2013). اجرای پروژه‌های میدانی نقش موثری در اتخاذ تصمیمات منطقه‌ای برای دستیابی به کشاورزی پایدار خواهند داشت، ولی زمان‌بر بودن هزینه‌های تحقیقات میدانی و عدم امکان بررسی کلیه سناریوهای موجود، وابستگی مکانی و زمانی نتایج حاصل از آن، تصمیم‌گیری‌های جامع و کارآمد را با چالش مواجه نموده است. در چنین شرایطی، مدل‌سازی گیاهی یکی از روش‌های موثر و پشتیبان برای تصمیم‌گیری محسوب شده و به همین دلیل در سال‌های اخیر، توجه محققان بسیاری را به خود معطوف داشته است (Hoogenboom *et al*., 2015). دانش مدل‌سازی قادر به شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی و تغییرات رشد و نمو گیاهان است. در پژوهشی بر روی گندم نشان داده شد که مدل‌سازی گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد زیستی، شاخص برداشت و تعداد برگ دقت کافی داشته و پیش‌بینی‌ها نشان داد که مقادیر RMSE برای صفات یاد شده کمتر از ۱۰ درصد بود (Mansouri *et al*., 2015).

یکی از مناسب‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی رشد و

نمو گیاهان زراعی مدل DSSAT (Decision Support System for Agretechnology Transfer) یا "نظام پشتیبان تصمیم‌گیری برای انتقال فناوری کشاورزی" می‌باشد (Jones *et al.*,1998). مدل‌سازی رشد و عملکرد کلزا یک روش مفید برای پیش‌بینی پاسخ گیاه به محیط‌های مختلف، به‌ویژه در شرایط تغییر آب و هوا است (Qian *et al.*, 2018). در مقایسه با غلات، مدل‌های محدودی برای محصول کلزا معرفی شده است. برخی از مدل‌های شبیه‌سازی کلزا مانند CERES-Rape (Gabrielle *et al.*, 1998) و LINTUL-BRASNAP (Habekotté, 1997) و در برنامه DSSAT مدل CSM-CROPGRO-Canola (Hoogenboom *et al.*, 2017) مورد توجه قرار گرفته‌اند.

هدف از این تحقیق ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد دانه در مزارع کلزای زمستانه با استفاده از برنامه DSSAT و پیش‌بینی اثر منفی تغییر اقلیم بر تولید کلزا در دشت دهگلان استان کردستان بوده است.

مواد و روش‌ها

آزمایشات مزرعه‌ای در سال‌های زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ (۲۰۱۹-۲۰۱۸ و ۲۰۱۸-۲۰۱۷) در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان با مختصات جغرافیایی ۳۵/۱۸ درجه شمالی و ۴۷/۱۸ درجه شرقی، ارتفاع از سطح دریا ۱۸۶۹ متر و میانگین بارندگی بلند مدت سالانه ۳۵۰/۹ میلی‌متر اجرا شد. بر اساس طبقه‌بندی آمبرژه آب و هوای منطقه، مدیترانه‌ای و از نوع نیمه‌خشک سرد می‌باشد (Hanafi and Hatami., 2014).

آزمایش در هر دو سال به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح آبیاری (کرت‌های اصلی) شامل ۲۵ درصد (W1)، ۵۰ درصد (W2)، ۷۵ درصد (W3) و ۱۰۰ درصد (W4) نیاز آبی گیاه (مقدار آب آبیاری برای تیمار ۱۰۰درصد، ۴۰۳۰ مترمکعب در هکتار بود) و چهار سطح کود نیتروژن (کرت‌های فرعی) شامل ۲۵ درصد (N1)، ۵۰ درصد (N2)، ۷۵ درصد (N3) و ۱۰۰ درصد (N4) نیاز کودی گیاه بودند. در تیمارهای N1، N2، N3 و N4 به‌ترتیب ۴۳/۷، ۸۷/۴، ۱۳۱/۱ و ۱۷۴/۸ کیلوگرم نیتروژن در هکتار مصرف شد. مقدار نیتروژن مصرفی بر اساس محتوای کربن آلی حاصل از نتیجه آزمون خاک و دستور العمل موسسه تحقیقات آب و خاک ایران (Nourgholipour *et al*., 2015) محاسبه شد. ابعاد کرت‌های آزمایشی ۷×۲/۱ متر، فاصله بین کرت‌های اصلی دو متر، کرت‌های فرعی یک متر و فاصله بین تکرارها دو متر در نظر گرفته شد. میزان آب آبیاری با استفاده از کنتور اندازه‌گیری و آبیاری به روش تحت‌فشار از نوع قطره‌ای با استفاده از نوار (تیپ) انجام شد. نیاز آبی گیاه با استفاده از روش پنمن- مونتیث فائو محاسبه شد (Fisher *et al*., 2017; Allen *et al*., 1998). داده‌های مورد نیاز روش پنمن- مونتیث فائو از اطلاعات روزانه هواشناسی (دما، بارندگی، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد) ایستگاه هواشناسی واقع در محل اجرای آزمایش بدست آمدند. بعد از آماده‌سازی زمین در شهریور کودهای پایه مورد نیاز شامل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفر (از منبع سوپرفسفات تریپل) و ۵۰ کیلوگرم در هکتار پتاس (از منبع سولفات پتاسیم) قبل از کاشت به خاک داده شدند. بذرهای کلزای رقم نپتون (هیبرید زمستانه فرانسوی) با استفاده از دستگاه خطی‌کار (ریزدانه کار) با تراکم ۴۰ بوته در مترمربع (فاصله بین ردیف‌ها ۳۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف‌ها ۸ سانتی‌متر) کاشته شدند. تاریخ‌های کاشت در سال اول و دوم به ترتیب اول مهر و ۲۶ شهریور بودند. علف‌های‌هرز باریک برگ با استفاده از علف‌کش هالوکسی فوپ آر متیل (۰/۶ لیتر در هکتار) و علف‌های هرز پهن‌برگ با وجین دستی کنترل شدند. در طول فصل رشد آفت شته با استفاده از سم پیریمور کنترل شد. تیمارهای آبیاری بعد

از مرحله روزت بوته‌ها اعمال شدند. در زمان کاشت بخشی از کود نیتروژن (معادل ۲۳ کیلوگرم در هکتار (از منبع کود اوره) برای کلیه تیمارها بصورت یکسان به خاک داده شد. مصرف آب در کلیه تیمارها تا پایان مرحله روزت بوته‌ها یکسان بود و تیمارهای آبیاری و مصرف بقیه تیمارهای کود نیتروژن پس از شروع رشد مجدد بوته‌ها در فصل بهار اعمال شدند. در طول فصل رشد در فواصل زمانی ۱۲ تا ۱۵ روزه نمونه‌برداری تخریبی روی ۱۰ بوته (۰/۲۵ متر مربع) از خطوط میانی هر کرت با رعایت اثر حاشیه جهت اندازه‌گیری سطح برگ و وزن خشک گیاه انجام شد. در پایان فصل رشد و در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک از قسمت دست نخورده کرت‌های آزمایشی، محصول دو مترمربع با رعایت اثر حاشیه برداشت و عملکرد دانه، عملکرد زیستی اندازه‌گیری و شاخص برداشت محاسبه شد.

به‌منظور شبیه‌سازی مدل اقلیمی، ابتدا متغیرهای اقلیمی از سال ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ به چهار دوره ۲۰ ساله بصورت ۲۰۴۰-۲۰۲۱ (۲۱۴۰)، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ (۴۱۶۰)، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ (۶۱۸۰) و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ (۸۱۱۰۰) تقسیم و در مرحله بعد این متغیرها به عنوان ورودی در مدل شبیه‌ساز رشد و نمو کلزا تعریف شدند تا تغییرات متناسب عملکرد مورد ارزیابی قرار گیرد. برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در آینده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (Statistical Down Scaling Model; SDSM) استفاده شد. این مدل پیش‌بینی‌های اقلیمی را با استفاده از سناریوهای بیلان تابش (RCP) انجام می‌دهد. برای وضعیت آب و هوای آینده مجموعه سناریوهای CanESM که توسط مرکز کانادایی Canadian Erth System Modeling تحت نشانگرهای مسیر غلظت (RCP) منتشر شده از سه سناریو (RCP2.6 ، RCP4.5 و RCP8.5) استفاده شد. غلظت دی‌اکسید کربن در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 تا سال ۲۱۰۰ به‌ترتیب ۴۲۱، ۵۳۸ و ۹۳۶ قسمت در میلیون برآورد شده است (Meinshausen *et al.*, 2011). در صورت عدم برنامه‌ریزی جهت کاهش غلظت گازهای گلخانه‌ای و مقابله با خسارت‌های تغییر اقلیم، آب و هوای کره زمین با سناریوی RCP8.5 پیش خواهد رفت که در این وضعیت تا سال ۲۱۰۰ واداشت تابشی زمین ۸/۵ وات بر مترمربع خواهد بود (Heidarybeni *et al.*, 2018). میزان افزایش دما در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای سال ۲۰۶۰ به‌ترتیب ۱، ۱/۴ و ۲ درجه سانتی‌گراد و برای سال ۲۱۰۰ به‌ترتیب ۱، ۱/۸ و ۳/۷ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است (IPCC, 2013). به‌منظور اعتبارسنجی مدل اقلیمی از اطلاعات هواشناسی ثبت شده (تابش، دمای حداکثر، دمای حداقل و بارندگی) از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۲۰ در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک محل اجرای آزمایش استفاده شد. داده‌های هواشناسی با استفاده از مدل اقلیمی شبیه‌سازی شده و با داده‌های اقلیمی مشاهده شده مقایسه شدند.

در دهه‌های اخیر برنامه‌ای با عنوان DSSAT که یک برنامه توانمند برای مدل‌سازی گیاهان زراعی است در سطح جهانی مورد استفاد قرار گرفته است.در این برنامه امکان بررسی بیلان آب و برآورد نیاز غذایی در شرایط منطقه‌ای و مدیریتی خاص وجود دارد. در این برنامه امکان شبیه‌سازی عملکرد بیش از ۴۲ گیاه زراعی و باغی وجود داشته و در مواردی مانند مدیریت‌های کودی و آبی، مدیریت تاریخ کشت، تناوب زراعی، اثر آب و هوا و تغییر اقلیم در بیش از ۱۰۰ کشور جهان استفاده شده است (Hoogenboom *et al.*, 2015). مدل CSM-CROPGRO-Canola در برنامه DSSAT (Hoogenboom *et al.*, 2015; Deligios *et al.*, 2013) برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزا سازگار شده است. در این تحقیق نیز شبیه‌سازی عملکرد کلزا در شرایط تغییرات اقلیمی آینده با استفاده از نسخه ۴/۷ برنامه DSSAT و مدل CSM-CROPGRO-Canola (Qian *et al.*, 2018) انجام شد.

به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل رشد -CSM

CROPGRO-Canola، از آزمایشات مزرعه‌ای اجرا شده در مزرعه استفاده شد. از داده‌های سال اول برای واسنجی مدل و از داده‌های سال دوم برای تعیین اعتبار مدل استفاده شد. برای واسنجی مدل، در سال اول اطلاعات مزرعه شامل اطلاعات هواشناسی، خاک، گیاه و عملیات زراعی وارد مدل شده و واسنجی پارامترهای مدل براساس داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه انجام گرفت.

برای تعیین اعتبار مدل، اطلاعات مربوط به عملکرد دانه و شاخص سطح برگ، عملکرد زیستی و شاخص برداشت در سال دوم با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل مورد ارزیابی آماری قرار گرفتند. در این مرحله نیز اطلاعات هواشناسی سال دوم آزمایش و همچنین اطلاعات خاک، گیاه و عملیات زراعی انجام شده در سال دوم به‌عنوان ورودی در مدل تعریف شده و مدل صفات مورد نظر را شبیه‌سازی نمود.

به منظور ارزیابی مدل اقلیمی و مدل رشد و نمو گیاهی، خروجی مدل‌ها با داده‌های مشاهده شده مقایسه و مدل‌ها اعتبارسنجی شدند. برای این منظور از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، کارایی مدل‌سازی (ME) و مقایسه رگرسیونی با خط ۱:۱ استفاده شد. شاخص جذر میانگین مربعات خطا با استفاده از رابطه یک به دست آمد (Mansouri *et al.*, 2015).

$$RMSE\% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-S_i)^2}{n}} * \frac{100}{\bar{O}}$$ (رابطه ۱)

O_i و S_i: به‌ترتیب مقدار مشاهده شده و مقدار شبیه‌سازی شده، n: تعداد کل مشاهدات، $\bar{O}$: میانگین مشاهدات هستند. اگر مقادیر RMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد، شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد ضعیف خواهد بود (Akumaga *et al.*, 2017).

جهت ارزیابی و تعیین اعتبار مدل از شاخص کارایی مدل‌سازی (ME) استفاده شد (رابطه ۲). (Mansouri *et al.*, 2015).

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\bar{O}-O_i)^2}$$ (رابطه ۲)

O_i و P_i: به‌ترتیب مقدار مشاهده شده و مقدار شبیه‌سازی شده و $\bar{O}$: میانگین مشاهدات هستند.

برای ارزیابی اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده از روش مقایسه رگرسیون خطی نتایج در برابر خط ۱:۱ استفاده شد. رگرسیون خطی بین داده‌های اندازه‌گیری شده به عنوان متغیر x و شبیه‌سازی شده به عنوان متغیر y به صورت (y = a + bx) برازش داده شد. عرض از مبدا (a) و شیب خط رگرسیون (b) با عرض از مبدا و شیب خط ۱:۱ با معادله (y=x) با استفاده از آزمون t مقایسه شدند. عرض از مبدا خط ۱:۱ برابر با صفر و شیب آن برابر با یک در نظر گرفته شدند. عدم تفاوت معنی‌دار بین شیب و عرض از مبدا رگرسیون‌های مذکور نشان‌دهنده توانایی و دقت بالای مدل در شبیه‌سازی داده‌ها می‌باشد (Mansouri *et al.*, 2015). پس از اعتبارسنجی مدل اقلیمی و مدل رشد و نمو گیاهی، خروجی‌های مدل اقلیمی براساس دوره‌های زمانی و سناریوهای مورد نظر، به‌صورت یک فایل با عنوان داده‌های پیش‌بینی‌شده و به‌صورت یک ورودی وارد برنامه DSSAT شده و مدل گیاهی CSM-CROPGRO-Canola تغییرات رشد و نمو و عملکرد کلزا را برای سناریوهای آینده پیش‌بینی کرد. در مرحله شبیه‌سازی رشد و نمو کلزا در شرایط تغییر اقلیم تنها متغیر برنامه، داده‌های هواشناسی بود و سایر عملیات زراعی برای تمام سناریوها یکسان در نظر گرفته شدند تا میزان تغییرات عملکرد در شرایط عدم محدودیت مدیریتی و زراعی فقط بر اساس تغییر اقلیم شبیه‌سازی شود. بعد از اجرای شبیه‌سازی، خروجی مدل با داده‌های سال مبنا (۲۰۱۸-۲۰۱۹) مقایسه شده و میزان تغییرات در عملکرد کلزا نسبت به شرایط کنونی مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۱- ضرایب ژنتیکی مورد استفاده برای کلزا رقم نپتون

Table 1. Genetic coefficients for oilseed rape cv. Nepton

علائم اختصاری Abbreviations	متغیر Variable	ضرایب Coefficient	راهنمایی برای کالیبراسیون Guide for calibration
G1	طول روز کوتاه بحرانی که در کمتر از آن رشد گیاه بدون اثر طول روز ادامه می‌یابد (گیاهان روز کوتاه) Critical short day length below which plant growth continues without the effect of day length (shortday plants) (hours)	16	(Deligios *et al.*, 2013)
G2	نسبت پاسخ رشد به دوره نوری با زمان (مثبت برای گیاهان روز کوتاه) The slope of the relative response of development to photoperiod with time (positive for short-day plants) (1/hour)	-0.006	(Qian *et al.*, 2018)
G3	زمان بین ظهور گیاهچه و ظهور گل (R1) (روزهای فتوترمال) Time between seedling emergence and flowering (R1) (Photothermal Days)	58	داده‌های مزرعه Field data
G4	زمان بین ظهور اولین گل و اولین غلاف (R3) (روزهای فتوترمال) Time between first flower and first pod (R3) (Photothermal Days)	16.02	داده‌های مزرعه Field data
G5	زمان بین ظهور اولین گل و اولین دانه (R5) (روزهای فتوترمال) Time between first flower and first seed (R5) (Photothermal Days)	37.51	داده‌های مزرعه Field data
G6	زمان بین ظهور اولین دانه (R5) و رسیدگی فیزیولوژیک (R7) (روزهای فتوترمال) Time between first seed (R5) and physiological maturity (R7) (Photothermal Days)	38.73	داده‌های مزرعه Field data
G7	زمان بین ظهور اولین گل (RI) و پایان رشد برگ (روزهای فتوترمال) Time between flowering (R1) and end of leaf expansion (Photothermal Days)	40.51	(Deligios *et al.*, 2013)
G8	حداکثر سرعت فتوسنتز برگ در ۳۰ درجه سانتی‌گراد، ۳۵۰ قسمت در میلیون دی‌اکسید کربن و نور زیاد Maximum leaf photosynthesis rate at 30°C, 350 ppm CO_2 and high light (mg $CO_2.m^{-2}.sec^{-1}$)	0.9	(Saseendran *et al.*, 2010)
G9	سطح مخصوص برگ در شرایط رشد عادی Specific leaf area under standard growth conditions ($cm^2.g^{-1}$)	250.7	داده‌های مزرعه Field data
G10	حداکثر اندازه برگ کامل Maximum full leaf size (cm^2)	125	داده‌های مزرعه Field data
G11	حداکثر کسری از رشد روزانه که بین دانه + پوسته تقسیم می‌شود Maximum fraction of daily growth that is partitioned to seed + shell	1	(Deligios *et al.*, 2013)
G12	حداکثر وزن دانه Maximum seed weight (g)	0.0033	داده‌های مزرعه Field data
G13	مدت پر شدن دانه در غلاف در شرایط رشد عادی (روزهای فتوترمال) Seed filling duration in pod under standard growth conditions (Photothermal Days)	28.27	داده‌های مزرعه Field data
G14	میانگین تعداد دانه در غلاف در شرایط رشد عادی Average seed per pod under standard growing conditions	21.55	داده‌های مزرعه Field data
G15	مدت زمان لازم برای رسیدن به مرحله پر شدن غلاف در شرایط بهینه Time required to reach final pod load under optimal conditions (Photothermal Days)	9	(Saseendran *et al.*, 2010)

نتایج و بحث

ضرایب ژنتیکی استفاده شده در مدل رشد که با استفاده از اطلاعات مزرعه‌ای و منابع مختلف پارامتریابی شده‌اند، در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج اعتبار سنجی مدل اقلیمی نشان داد که مدل از دقت کافی برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی برخوردار بود (شکل ۱). نتایج پیش‌بینی آب‌وهوا نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل در پیش‌بینی دمای حداکثر نسبت به دمای حداقل، تابش خورشیدی و بارش بود. نتایج RMSE نشان داد که مدل متغیرهای اقلیمی دمای حداکثر، تابش خورشیدی و دمای حداقل را به ترتیب با اختلاف ۷/۸۲±، ۸/۵۰± و ۱۷/۴۱± درصد نسبت به داده‌های مشاهده شده، شبیه‌سازی کرد، درحالی‌که دقت پیش‌بینی بارش (با مقدار RMSE ۲۶/۲۹ ± درصد) در مقایسه با سایر شاخص‌های آب و هوایی کمتر بود (شکل ۱). نتایج پیش‌بینی آب و هوایی در سه

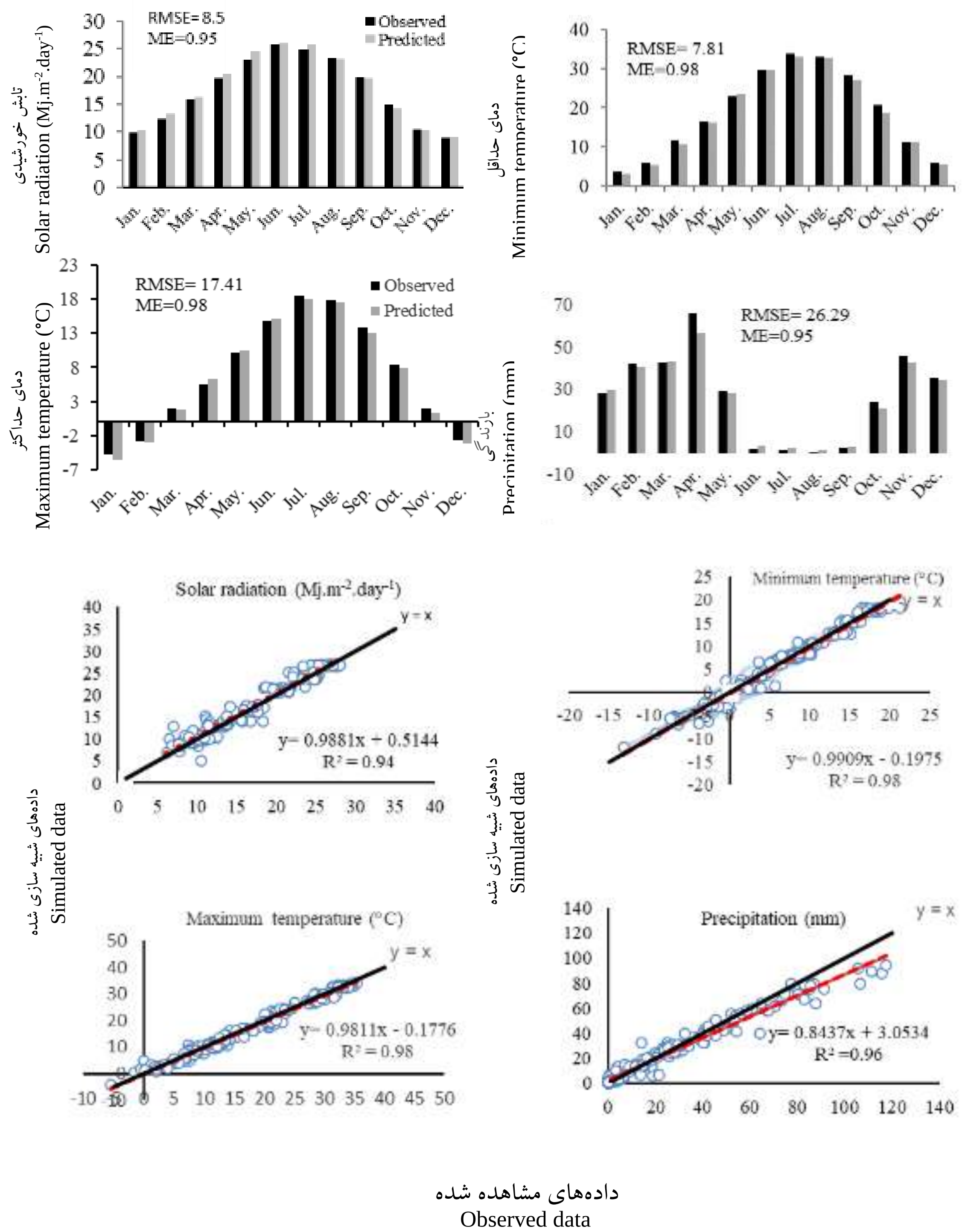
منطقه اردبیل، آذربایجان‌شرقی و غربی بر اساس شاخص RMSE نشان داد که پیش‌بینی دماهای حداکثر (با مقدار RMSE کمتر از ۱۰ درصد) نسبت به حداقل دما و بارش (با مقدار RMSE بین ۱۰ تا ۱۴ درصد) در تمام مناطق از دقت بالاتری برخوردار بودند (Mansouri *et al.*, 2015). در یک پژوهش روی گندم، نتایج اعتبار سنجی داده‌های آب و هوایی مناطق سنندج و قروه توانایی خوبی برای پیش‌بینی تغییرات دما را نشان داد، در حالی که قابلیت آن برای پیش‌بینی بارش ضعیف بود (Rezaie *et al.*, 2022) که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت. مقادیر به دست آمده برای شاخص کارایی مدل‌سازی نیز نشان از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی داشت و برای تمام متغیرهای اقلیمی شاخص کارایی مدل‌سازی بالای ۰/۹۵ بود. نتایج آزمون t برای مقایسه شیب و عرض از مبدا خط ۱:۱ با رگرسیون خطی برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین شیب و عرض از مبدا رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ برای تمام متغیرهای اقلیمی (بجز بارندگی) وجود نداشت (جدول ۲).

جدول ۲- آزمون t برای مقایسه خط ۱:۱ و معادله رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای گیاه کلزا

Table 2. Results of the t-test for comparing the 1:1 line against the fitted linear regression between observed and simulated data for oilseed rape (Simulated = a + b×Observed)

شاخص‌های اقلیمی Climatic indicators		ضرایب Coefficients	خطای استاندارد Std. Error	p-value	t-value	رابطه Eq	فرض صفر (a=0, b=1) H0	ضریب تبیین R2
تابش خورشیدی	a	0.5144	0.309	0.098	1.663	y = 0.9881x + 0.5144	Accepted	0.94
Solar irradiation (Rs)	b	0.9881	0.017	0.478	0.711		Accepted	
دمای حداکثر	a	-0.1776	0.205	0.386	0.868	Y=0.9811x + 0.1776	Accepted	0.98
Maximum temperature (Tmax)	b	0.9811	0.010	0.051	1.961		Accepted	
دمای حداقل	a	-0.1975	0.117	0.093	1.689	y = 0.9909x - 0.1975	Accepted	0.98
Minimum temperature (Tmin)	b	0.9909	0.011	0.409	0.828		Accepted	
بارندگی	a	3.0534	0.483	0.0001	6.322	y = 0.8437x + 3.0534	Rejected	0.96
Precipitation (Prec)	b	0.8437	0.012	0.0001	12.702		Rejected	

نتایج آزمون اعتبار سنجی نشان داد که مدل از دقت کافی برای شبیه‌سازی داده‌های عملکرد زیستی، عملکرد دانه، شاخص برداشت و حداکثر شاخص سطح برگ برخوردار بود (جدول ۳). نتایج RMSE نشان داد که مدل متغیرهای رشد گیاهی عملکرد زیستی، عملکرد دانه، شاخص برداشت و حداکثر شاخص سطح برگ را به ترتیب با اختلاف ۱۰/۱۲±، ۱۱/۸۰±، ۸/۶۴± و ۱۳/۳۰± درصد نسبت به داده‌های مشاهده شده، شبیه-سازی نمود. دقت پیش‌بینی شاخص برداشت (با مقدار RMSE کمتر از ۱۰ درصد) در مقایسه با سایر شاخص‌های زراعی بیشتر بود (جدول ۳). مقادیر به دست آمده برای کارایی مدل‌سازی دقت بالای ۸۵ درصد را برای عملکرد زیستی، عملکرد دانه و شاخص برداشت نشان داد، ولی این شاخص برای حداکثر شاخص سطح برگ (۵۳ درصد) کمترین مقدار را داشت (جدول ۳). نتایج آزمون t برای مقایسه شیب و عرض از مبدا خط ۱:۱ با رگرسیون خطی برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین شیب و عرض از مبدا رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ برای متغیرهای رشد گیاهی (بجز عرض از مبداء (a) در صفت عملکرد زیستی) وجود نداشت (جدول ۴).



شکل ۱- اعتبارسنجی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده متغیرهای اقلیمی از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۰ بر اساس شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، کارایی مدل سازی (ME) و مقایسه رگرسیون خطی با خط ۱:۱ (میانگین دمای ماهانه در ۱۵ سال) برای گیاه کلزا

Fig. 1. Validation of observed and predicted values of climate variables from 2006 to 2020 year based on Root Mean-Squared Error (RMSE), Modeling efficiency (ME) and comparison of linear regression against the 1:1 line (average of monthly temperature during 15 years) for oilseed rape

جدول۳- مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده عملکرد دانه و عملکرد زیستی، شاخص برداشت و شاخص سطح برگ کلزا بر اساس ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و کارایی مدل‌سازی(ME)

Table 3. Simulated and observed values of seed yield, biological yield, harvest index and leaf area index of oilseed rape based on Root Mean-Squared Error (RMSE) and modelling efficiency (ME)

صفات Traits	عملکرد زیستی Biological yield	عملکرد دانه Seed yield	شاخص برداشت Harvest index	حداکثر شاخص سطح برگ Maximum leaf area index
RMSE%	10.12	11.8	8.64	13.3
ME	0.89	0.94	0.86	0.53

جدول ۴- نتایج آزمون t برای مقایسه خط ۱:۱ و زابطه رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و شبیه سازی شده برای گیاه کلزا

Table 4. Results of the t-test for comparing the 1:1 line against the fitted linear regression between observed and simulated data for oilseed rape (Simulated = a + b×Observed)

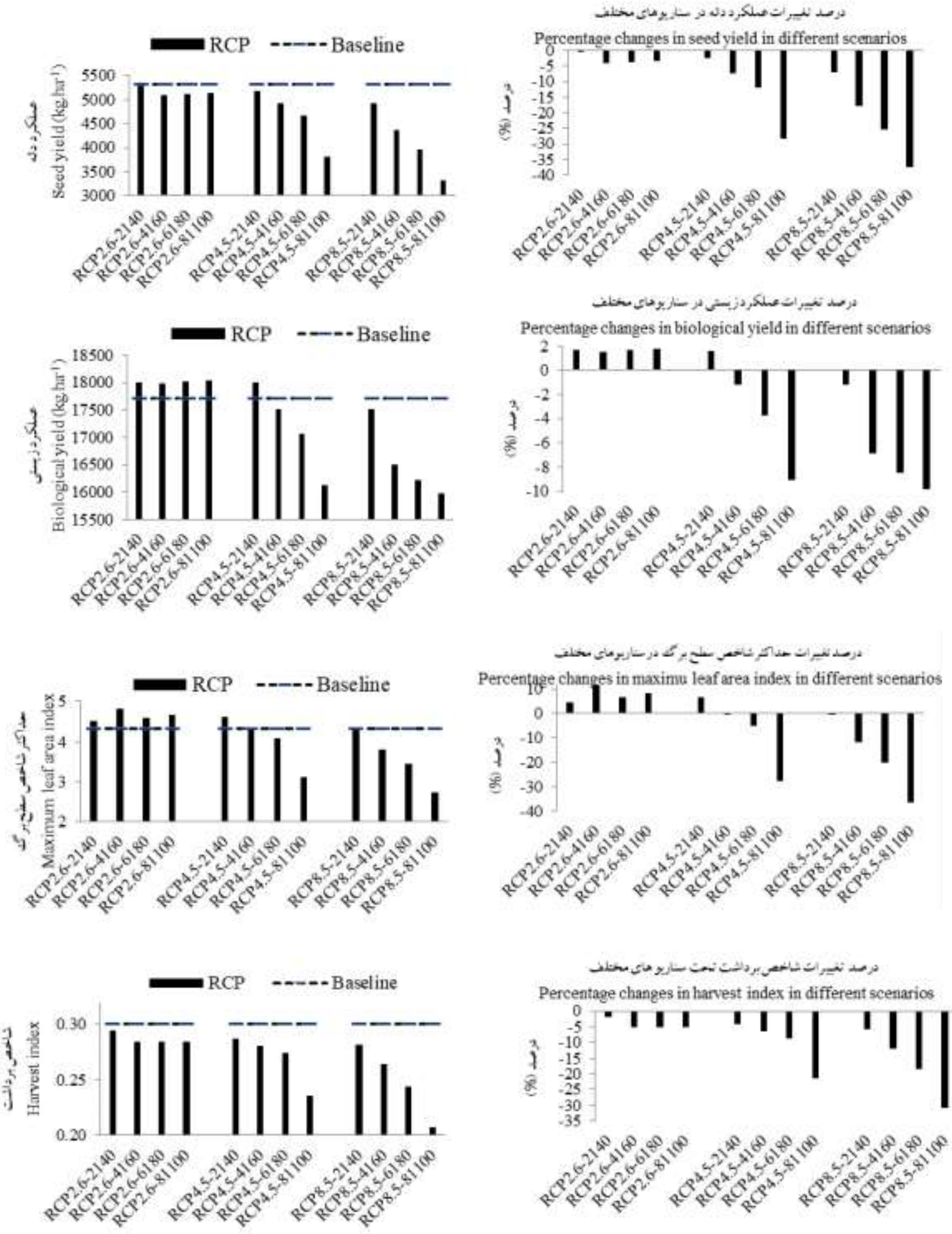
صفات و شاخص‌های گیاهی Plant traits and indices		ضرایب Coefficients	خطای استاندارد Std. Error	p-value	t-value	رابطه Eq	فرض صفر (a=0, b=1) H0	ضریب تبیین R2
عملکرد زیستی Biological yield	a	2279.1	894.165	0.022	2.549	y = 0.8667x + 2279.1	Rejected	0.92
	b	0.8667	0.069	0.073	1.928		Accepted	
عملکرد دانه Seed yield	a	129.6	183.715	0.491	0.705	y = 0.9854x + 129.6	Accepted	0.95
	b	0.9854	0.062	0.817	0.235		Accepted	
شاخص برداشت Harvest index	a	-0.1242	2.023	0.952	0.061	y = 0.9946x - 0.1242	Accepted	0.88
	b	0.9946	0.098	0.960	0.051		Accepted	
حداکثر شاخص سطح برگ Maximum leaf area index	a	-0.640	0.519	0.236	1.233	y = 1.2328x - 0.64	Accepted	0.79
	b	1.2328	0.170	0.191	1.371		Accepted	

در بررسی اثر تغییر اقلیم روی نتایج شبیه‌سازی نشان داد که حداکثر شاخص سطح برگ در کلیه سناریوها تحت تاثیر تغییر اقلیم قرار خواهد گرفت. حداقل و حداکثر تفاوت نسبت به مقدار حداکثر شاخص سطح برگ در شرایط کنونی (۴/۳۱) به‌ترتیب به RCP8.5 در دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ (۲/۷۴) با ۳۶/۴۶- درصد و RCP2.6 در دوره زمانی ۲۰۶۰-۲۰۴۱ (۴/۸۱) با ۱۱/۵۵ درصد تعلق داشت. حداکثر شاخص سطح برگ در کلیه دورهای زمانی ((۲۰۴۰-۲۰۲۱ (۴/۵۹)، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ (۴/۸۱)، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ (۴/۶) و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ (۴/۶۷)) در سناریو RCP2.6 و دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ (۴/۶۱) در سناریو RCP4.5 نسبت به حداکثر شاخص سطح برگ سال پایه (۴/۳۱) بیشتر و در سایر سناریوها و دوره‌های زمانی مورد بررسی کمتر بود (شکل ۲). در سناریوی RCP2.6 بیشترین مقدار شاخص سطح برگ به دوره زمانی ۲۰۶۰-۲۰۴۱ (۴/۸۱) تعلق داشت. در RCP4.5 ابتدا در دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ حداکثر شاخص سطح برگ (۴/۶۱) نسبت به حداکثر شاخص سطح برگ سال پایه (۴/۳۱) بیشتر بود، درحالیکه در سایر دوره‌های زمانی، با گذشت زمان این شاخص کاهش یافت که نشان دهنده تاثیر و اهمیت دوره زمانی در این سناریو است، اما در RCP8.5 حداکثر شاخص سطح برگ در کلیه دوره‌های زمانی نسبت به شرایط کنونی کمتر بود، بطوریکه با گذشت زمان از دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ تا دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۸۱، حداکثر شاخص سطح برگ از ۴/۲۹ به ۲/۷۴ رسید که این موضوع نشان دهنده اهمیت و تاثیر نوع سناریو و دوره زمانی در این شاخص است. بر اساس نتایج

شبیه سازی، افزایش شاخص سطح برگ بیشتر در سناریوی RCP2.6 مشاهده شد که سناریوی زیست محیطی بوده و هدف آن کاهش انتشار گازهای گلخانه ای در آینده است. در این سناریو پیش‌بینی شده که افزایش دما نسبت به دو سناریوی دیگر پایین باشد، بنابراین سطح برگ در این سناریو نسبت به دو سناریوی دیگر کمتر تحت تاثیر تنش گرمایی قرار می‌گیرد. از طرف دیگر با افزایش میزان دی‌اکسید کربن در آینده انتظار می‌رود که فتوسنتز گیاهان سه کربنه چون کلزا بهبود یابد؛ بنابراین افزایش شاخص سطح برگ در سناریوی RCP2.6 را می‌توان به افزایش فتوسنتز و در نتیجه افزایش رشد گیاه کلزا نسبت داد؛ در صورتیکه در سناریوهای دیگر به نظر می‌رسد که افزایش دما، اثرات مثبت افزایش دی‌اکسید کربن را خنثی کرده و حتی باعث کاهش رشد گیاه می‌شود.

در یک پژوهش در کاسیلیان واقع در شمال ایران روی سه پوشش گیاهی (جنگل‌های پهن برگ، بوته‌ها و گیاهان سه کربنی) نشان داده شده که شاخص سطح برگ در کلیه پوشش‌های گیاهی، بر خلاف نتایج آزمایش حاضر، در سناریوی RCP8.5 بیشتر از RCP2.6 افزایش می‌یابد (Ramezani *et al*., 2020). نتایج یک آزمایش در کرج روی گیاه ذرت با استفاده از مدل CRESE-Maize از بسته نرم‌افزاری DSSAT نشان داد که مدل در پیش‌بینی روند تغییرات شاخص سطح برگ، رشد و نمو و عملکرد گیاه در سطوح مختلف نیتروژن موفق بوده و نتیجه گرفته شد که می‌توان برای اهداف پژوهشی مورد نظر در شرایط اقلیمی منطقه کرج از مدل مذکور استفاده کرد(Paknejad *et al*., 2017). در استرالیا با توجه به اینکه انتظار می‌رفت شاخص سطح برگ برای انواع پوشش‌های گیاهی کاهش یابد، ولی نتایج یک تحقیق روی سه نوع پوشش گیاهی (گیاه زراعی، مرتع و درخت) در پاسخ به افزایش میانگین دمای ماهانه و کاهش بارندگی در چهار سناریو RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و .RCP8 نشان داد که واکنش شاخص سطح برگ در پاسخ به تغییرات آب و هوایی از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است و به متغیرهای آب و هوایی در آینده بستگی دارد. بنابراین ارزیابی واکنش شاخص سطح برگ برای هر منطقه ضروری است (Tesemma *et al*., 2014).

اثر تغییر اقلیم بر نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کمترین و بیشترین مقدار عملکرد زیستی شبیه‌سازی شده در مقایسه با عملکرد زیستی سال پایه (به ترتیب در دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ به سناریوی RCP2.6 (۱۸۰۳۵ کیلوگرم در هکتار) با افزایش ۱/۷۹ درصد و سناریوی RCP8.5 (۱۵۹۷۹ کیلوگرم در هکتار) با کاهش ۹/۸۱ درصد تعلق داشتند. در سناریوی RCP2.6 کمترین افزایش عملکرد زیستی نسبت به سال پایه به دوره زمانی ۲۰۶۰-۲۰۴۱ (۱۷۹۸۰ کیلوگرم در هکتار) تعلق داشت (شکل ۲). در سناریوی RCP4.5 ابتدا در دروه زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ میزان عملکرد زیستی (۱۸۰۰۲ کیلوگرم در هکتار) نسبت به سال پایه ۱/۶۱ درصد افزایش و در بقیه دوره‌های زمانی با گذشت زمان کاهش یافت، اما در سناریوی RCP8.5 عملکرد زیستی نسبت به سال پایه با گذشت زمان کاهش یافت، بطوریکه در دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ به حداقل مقدار خود (۱۵۹۷۹ کیلوگرم در هکتار) رسید. میانگین عملکرد زیستی در دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ در سناریوی RCP2.6 (۱۸۰۰۹ کیلوگرم در هکتار) و RCP4.5 (۱۸۰۰۲ کیلوگرم در هکتار) نسبت به عملکرد زیستی سال پایه به ترتیب ۱/۶۵، ۱/۶۱ درصد افزایش و در سناریوی RCP8.5 (۱۷۵۰۵ کیلوگرم در هکتار) ۱/۲ درصد کاهش یافت و می‌توان نتیجه گرفت که بین دو سناریوی RCP2.6 و RCP4.5 در این دوره زمانی تفاوتی از لحاظ عملکرد زیستی وجود نداشت. بررسی نتایج شبیه‌سازی در دوره‌های زمانی آتی و سناریوهای مختلف نشان داد که در سناریوی RCP2.6 میزان عملکرد زیستی نسبت به سال پایه در تمام دوره‌های زمانی آینده افزایش یافت، در صورتی‌که در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5



شکل ۲- مقادیر شبیه سازی شده و درصد تغییرات عملکرد دانه، عملکرد زیستی، شاخص برداشت و شاخص سطح برگ کلزا در سناریوها و دوره‌های زمانی مختلف (۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ (۲۱۴۰)، ۲۰۴۱ تا ۲۰۶۰ (۴۱۶۰)، ۲۰۶۱ تا ۲۰۸۰ (۶۱۸۰) و ۲۰۸۱ تا ۲۱۰۰ (۸۱۱۰۰)

Fig. 2. Simulated values and percentage changes of seed yield, biological yield, harvest index and maximum leaf area index of oilseed rape in different scenarios and periods (2021 to 2040 (2140), 2041 to 2060 (4160), 2061 to 2080 (6180) and 2081 to 2100 (81100) year)

کاهش یافت که این روند کاهشی با گذشت زمان تشدید خواهد یافت (شکل ۲). نتایج نشان داد که در بین سناریوهای مورد بررسی، سناریوی RCP8.5 بیشترین اثر منفی و سناریوی RCP2.6 بیشترین اثر مثبت را بر عملکرد زیستی کلزا در شرایط تغییر اقلیم آینده خواهند داشت. به‌نظر می‌رسد که در سناریوی RCP2.6 که یک سناریوی خوشبینانه است، با توجه به افزایش دی‌اکسیدکربن و عدم افزایش زیاد دما، احتمالاً به نفع گیاهان سه کربنه بوده و نسبت به شرایط کنونی عملکرد بالاتری داشته باشد. نتایج نشان داد که گذشت زمان تاثیری بر عملکرد زیستی در سناریوی RCP2.6 نخواهد داشت، ولی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد زیستی در دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 تشدید خواهد شد. در یک پژوهش روی گندم که از برنامه DSSAT مدل CERES-(CSM) استفاده شده بود نشان داده شد که مدل از دقت کافی برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد زیستی، شاخص برداشت و تعداد برگ برخوردار بود، بطوری‌که مقادیر RMSE برای عملکرد دانه و عملکرد زیستی، شاخص برداشت و تعداد برگ را کمتر از ۱۰ درصد پیش‌بینی کرد (Mansouri *et al*., 2015). بررسی اثرات تغییر اقلیم در استان خراسان رضوی روی گیاه ذرت نشان داده شد که تغییرات اقلیم می‌تواند باعث کاهش عملکرد دانه، عملکرد زیستی و حداکثر شاخص سطح برگ در شرایط تغییرات آب و هوایی آینده شود (Moradi *et al*., 2013).

نتایج شبیه‌سازی عملکرد دانه در شرایط تغییر اقلیم در کلیه سناریوها نشان داد که میزان عملکرد دانه نسبت به شرایط فعلی (۵۳۰۹ کیلوگرم در هکتار) کاهش خواهد یافت (شکل ۲). کمترین و بیشترین کاهش عملکرد نسبت به عملکرد سال پایه به‌ترتیب به سناریوی RCP2.6 در دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ (۵۲۹۳ کیلوگرم در هکتار) با ۰/۳- درصد و سناریوی RCP8.5 در دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ (۳۳۱۳ کیلوگرم در هکتار) با ۳۷/۵۸- درصد تعلق داشت. در سناریوی RCP2.6 میزان عملکرد دانه در دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ با عملکرد دانه در شرایط کنونی اختلاف زیادی (۰/۳- درصد) نداشت، ولی در دوره‌های ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ در سناریوی RCP2.6 میزان عملکرد پیش‌بینی شده با عملکرد در سال پایه فاصله داشت، بطوریکه در این دوره‌های زمانی به ترتیب ۳/۹۶- ، ۳/۷۱- و ۳/۳۹- درصد با عملکرد در سال پایه اختلاف نشان داد، اما بین دوره‌های زمانی ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ درRCP2.6 تفاوت زیادی مشاهده نشد. در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 با گذشت زمان از دوره ۲۰۴۰- ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰-۲۰۸۱ به ترتیب از ۲/۵۲ تا ۲۸/۲۵ و ۷/۱۴ تا۳۷/۵۸ درصد عملکرد دانه نسبت به عملکرد سال پایه کاهش نشان داد که این موضوع نشان دهنده تاثیر دوره زمانی و سناریوی اقلیمی بر کاهش عملکرد دانه در شرایط آینده است. عملکرد کلزا در دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ در سناریوهای RCP2.6 (۵۲۹۳ کیلوگرم در هکتار)، RCP4.5 (۵۱۷۵ کیلوگرم در هکتار) و RCP8.5 (۴۹۳۰ کیلوگرم در هکتار)، نسبت به سال پایه به‌ترتیب ۰/۳، ۲/۵۲ و ۷/۱۴ درصد کاهش داشت. در سایر دوره‌های زمانی نیز کمترین کاهش عملکرد در سناریوی RCP2.6 و بیشترین کاهش در سناریوی RCP8.5 مشاهده شد (شکل ۲). افزایش بیشتر دما از ۲/۶ تا ۴/۸ درجه سانتی‌گراد در سناریوی RCP8.5 (IPCC, 2013) بطور غیرمستقیم و از طریق تأثیر بر طول مراحل فنولوژیکی و نیز مراحل حساس رشد گیاه مثل گلدهی و پرشدن دانه‌ها، باعث کاهش عملکرد بیشتر در این شرایط می‌شود. کاهش طول دوره رشد ناشی از افزایش دما در گیاهان زراعی باعث کاهش عملکرد می‌شود، زیرا گیاه زمان کمتری برای تجمع ماده خشک در اختیار دارد (Pourabrahimi Fomeni, 2018). نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سناریوی RCP8.5 بیشترین اثر منفی و سناریوی RCP2.6 کمترین اثر منفی را بر عملکرد دانه کلزا در

شرایط تغییر اقلیم آینده خواهند داشت. نتایج حاکی از این بود که با گذشت زمان اثرات منفی تغییر اقلیم بر عملکرد دانه، به‌ویژه در دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 تشدید خواهد شد.

نتایج یک آزمایش در ارتباط با اثر تغییر اقلیم روی کلزا در استان چهار محال و بختیاری نشان داد که میانگین عملکرد کلزا در سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۰ بر اساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 افزایش می‌یابد. میزان افزایش براساس سناریوی RCP4.5 ۹/۴ درصد و براساس سناریوی RCP8.5 ۱۳/۶ درصد نسبت به شرایط فعلی خواهد بود (Heidarybeni *et al.*, 2018). نتایج یک آزمایش در کانادا نشان داد که افزایش دما به میزان قابل توجهی بر تولید کلزا تاثیر می‌گذارد (Qian *et al.*, 2018). در این تحقیق با استفاده از مدل CSM-CROPGRO-Canola برای شبیه‌سازی پاسخ کلزا به تغییرات آب و هوایی در شرق کانادا گزارش شد که در مقایسه با آب و هوای پایه، میزان کاهش عملکرد دانه از ۲۱ تا ۴۲ درصد خواهد بود. در آینده نزدیک (۲۰۷۰-۲۰۴۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۱) در سناریوی RCP4.5 در مقایسه با آب و هوای پایه، کاهش عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در آینده نزدیک ۴۲، ۲۱ و ۲۴ درصد و در آینده‌ی دور ۳۷، ۲۷ و ۲۳ درصد به ترتیب برای Brandon، غرب Nipissing و Normandin بود در سناریوی RCP8.5، کاهش عملکرد در مناطق Brandon و غرب Nipissing به‌ویژه در آینده دور بیشتر خواهد بود (Qian *et al.*, 2018). نتایج یک آزمایش از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ در ۹ سایت در شمال شرقی چین نشان داد که دمای بالاتر در فصل رشد در سناریوهای RCP8.5 به دلیل افزایش تنش گرمایی در مقایسه با سناریوهای RCP4.5 در سایر مناطق که دما به ۳۰ درجه سانتی‌گراد رسید، اثرات منفی قابل‌توجهی بر عملکرد ذرت داشت (Jiang *et al.*, 2021).

نتایج شبیه‌سازی شاخص برداشت در شرایط تغییر اقلیم نشان داد که میزان شاخص برداشت نسبت به شرایط کنونی کاهش خواهد یافت (شکل ۴). کمترین و بیشترین کاهش شاخص برداشت نسبت سال پایه (۰/۳) به ترتیب به سناریوی RCP2.6 در دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ (۰/۲۹۴) با ۲- درصد و RCP8.5 در دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ (۰/۲۰۷) با ۳۱- درصد تعلق داشت. در سناریوی RCP2.6 در دوره‌های زمانی ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ میزان شاخص برداشت تفاوتی نداشتند و در واقع در این سناریو گذشت زمان تاثیری روی شاخص برداشت نداشت ولی در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 میزان شاخص برداشت با گذشت زمان به ترتیب از ۴/۳۳- تا ۲۱/۳۳- و ۶- تا ۳۱- درصد نسبت به شرایط کنونی کاهش یافت (شکل ۲). نتایج شبیه‌سازی نشان داد که همانند اثر تغییر اقلیم بر شاخص سطح برگ و عملکرد زیستی، سناریوی RCP2.6 کمترین اثر منفی و RCP8.5 بیشترین اثر منفی را بر شاخص برداشت کلزا در شرایط تغییر اقلیم آینده داشته و با گذشت زمان در دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 تغییر اقلیم اثرات منفی بیشتری بر شاخص برداشت خواهد گذاشت. نتایج یک تحقیق نشان داد که افزایش دما در شرایط تغییر اقلیم با کاهش دوره رشد گیاه، با اثر منفی بر دوره پر شدن دانه، باعث کاهش عملکرد و شاخص برداشت در مقایسه با وضعیت فعلی خواهد شد (Valizadeh *et al.*, 2014). نتایج شبیه‌سازی در یک پژوهش دیگر نیز نشان داد که تغییرات شاخص برداشت از روند عملکرد دانه پیروی می‌کند، به طوری که حداکثر میزان شاخص برداشت در تمامی زمان‌ها (از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۸۰) و سناریوها (RCP4.5 و RCP8.5) کمتر از شرایط پایه بود (Paymard *et al.*, 2018).

نتیجه‌گیری

نتایج اعتبار سنجی نشان داد که مدل اقلیمی از دقت کافی برای شبیه‌سازی داده‌های آب و هوایی برخوردار بود. نتایج پیش‌بینی آب و هوا نشان داد که مدل

متغیرهـای اقلیمـی دمـای حـداکثر و حـداقل و تـابش خورشـیدی را بـا اخـتلاف کمـی نسـبت بـه دادههـای مشـاهده شـده، شـبیهسـازی مینمایـد، درحالیکـه دقـت پیشبینی بارش در مقایسـه بـا سـایر متغیرهـا کمتـر بـود. براساس شاخصهای تعیین اعتبار مدل رشـد گیـاهی نیـز مدل از دقت کافی بـرای شبیهسـازی دادههـای عملکـرد زیسـتی، عملکـرد دانـه، شـاخص برداشـت و حـداکثر شاخص سطح برگ برخوردار بود. نتـایج ایـن پـژوهش نشان داد که تغییر اقلیم در شـرایط آینـده بـر عملکـرد و تولید کلزا اثر منفی خواهـد داشـت، بطوریکـه عملکـرد دانـه بسـته بـه سـناریو و دوره زمـانی از ۰/۳ تـا ۳۷/۵۸ درصد کاهش نسبت بـه عملکـرد در شـرایط کنـونی را خواهـد داشـت. در بـین سـناریوهای مـورد بررسـی، در سـناریوی RCP2.6 کلیـه صـفات مـورد ارزیـابی دارای کمترین تغییرات در آینده بودند، امـا حـداکثر تغییـرات در صـفات مـورد ارزیـابی بـه سـناریوی RCP8.5 تعلـق داشت. بنـابراین بـه منظـور مقابلـه بـا کـاهش عملکـرد و تولید کلزا و مدیریت اثرات منفی تغییـر اقلـیم در آینـده نیاز بـه برنامـهریـزی بـرای تعـدیل میـزان تغییـر اقلـیم بـا کـاهش انتشـار گازهـای گلخانـهای و اسـتفاده از سـناریوهای زیسـت محیطـی ماننـد سـناریوی RCP2.6 ضروری بـه نظـر میرسـد، زیـرا همـانطور کـه در ایـن تحقیق نیز پیشبینی شد، اثر منفـی تغییـر اقلـیم در چنـین سـناریوهایی کمتـر اسـت. سـایر راهکارهـا ماننـد بهبـود عملیات بهزراعی و بهنژادی نیـز از رویکردهـای مناسـب بـرای مقابلـه بـا تغییـر اقلـیم هسـتند کـه از جملـه آنهـا میتوان از تولید ارقام متحمل به تنش گرمـا یـا بـا طـول دوره رشـد کوتـاهتـر بـه عنـوان سـازگاری بـهنـژادی و تغییر تاریخ کاشت یا تغییر در مقـدار یـا زمـان مصـرف نهادههـا بـه عنـوان سـازگاری بـهزراعی کـه در کـاهش اثرات و پیامدهای منفی تغییر اقلیم موثر هستند، اسـتفاده کرد.

سپاسگزاری

نگارنـدگان مراتـب تشـکر و قـدردانی خـود را از دانشگاه کردستان جهت تـامین مـالی ایـن پـروژه اعـلام میدارند. همچنین از مدیریت و کارکنان محترم مزرعـه آموزشی و تحقیقاتی دانشگاه کردستان به پاس خـدمات ارزنده آنها در اجرای آزمایشات مزرعهای این پـژوهش تشکر و قدردانی میشود.

منابع مورد استفاده

References

Akumaga, U., Tarhule, A. and Yusuf, A. A. 2017. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, pp.225-234. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.011

Allen, R.G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. FAO, Rome, Italy. 300(9): D05109. https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm

Anonymous, 2022. Annual Agricultural Statistics. Ministry of Jihad-e-Agriculture of Iran, www. maj.ir

Deligios, P. A., Farci, R., Sulas, L., Hoogenboom, G. and Ledda, L. 2013. Predicting growth and yield of winter rapeseed in a Mediterranean environment: Model adaptation at a field scale. *Field Crops Research*, 144, pp.100-112. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.01.017

FAO, 2021. FAOSTAT Data. http://www.faostat.fao.org

Fisher, J. B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., McCabe, M. F., Hook, S.,

Baldocchi, D. and Townsend, P. A. 2017. The future of evapotranspiration: global requirements for ecosystem functioning, carbon and feedbacks, climate, agricultural management, and water resources. *Water Resources Research*, 53, pp.2618–2626. https://doi.org/10.1002/2016wr020175

Gabrielle, B., Denoroy, P., Gosse, G., Justes, E. and Andersen, M. N. 1998. Development and evaluation of a CERES-type model for winter oilseed rape. *Field Crops Research*, 57(1), pp.95-111. https://doi.org/10.1016/s0378-4290(97)00120-2

Habekotté, B. 1997. Options for increasing seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A simulation study. *Field Crops Research*, 54(2-3), pp.109-126. https://doi.org/10.1016/s0378-4290(97)00041-5

Hanafi, A and Hatami, A. 2014. Preparation of climate map of Kurdistan province using geographical information system. *Geographical Information Quarterly*, 22(87), pp.28-24. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.25883860.1392.22.87.3.4

Heidarybeni, M., Yazdanpanh. H. and Mehnatkesh, A. 2018. Impacts of climate change on canola yields and phenology (Case Study: Chahrmahal Va Bakhtiari, Iran). *Physical Geography Research Quarterly*, 50(2), pp.373-389. [In Persian]. https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.239399.1007101

Hoogenboom, G., Jones, J. W., Wilkens, P. W., Porter, C. H., Boote, K. J. and Hunt, L. A. 2015. Decision Support System For Agrotechnology Transfer. Version 4.6 (WWW.DSSAT.net). DSSAT Foundation, Prosser, WA. https://dssat.net

Hoogenboom, G., Porter, C. H., Shelia, V., Boote, K. J., Singh, U., White, J. W., Hunt, L. A., Ogoshi, R., Lizaso, J. I., Koo, J., Asseng, S., Singels, A., Moreno, L. P. and Jones, J. W. 2017. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7 (https://DSSAT.net). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA. https://dssat.net

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. https://doi.org/10.1017/cbo9781107415324

IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Jiang, R., He, W., He, L., Yang, J. Y., Qian, B., Zhou, W. and He, P. 2021. Modelling adaptation strategies to reduce adverse impacts of climate change on maize cropping system in Northeast China. *Scientific Reports*, 11(1), pp.810. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79988-3

Jones, J. W., Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., Hunt, L. A., Thornton, P. K., Wilkens, P. W., Imamura, D. T., Bowen, W. T. and Singh, U. 1998. Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT vol. 3. *In*:

Understanding Options for Agricultural Production. Springer Dordrecht. pp.157-177. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_8

Koocheki, A. and Kamali, G. H. 2010. Climate change and rainfed wheat production in Iran. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 8(3), pp.508-520. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/gsc.v8i3.7770

Mansouri, H., Raei, Y. and Zaeim, A. N. 2015. Simulating future wheat yield under climate change, carbon dioxide enrichment and technology improvement in Iran. Case study: Azarbaijan region. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(4), e0306. pp.1-12. https://dx.doi.org/10.5424/sjar/2015134-6970

Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L., Lamarque, H. F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C., Riahi, K. and Thomson, A. G. J. M. V. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1), pp.213-241. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z

Moradi, R., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M. and Mansoori, H. 2013. Adaptation strategies for maize cultivation under climate change in Iran: irrigation and planting date management. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(2), pp.265-284. https://doi.org/10.1007/s11027-012-9410-6

Nourgholipour, F., Rezaei, H., Mirzashahi, K., Gheibi, M. N., Haghighatnia, H., Ramezanpour, M. R., Arzanesh, M. H., Asadi Rahmani, H., Mirzapour, M. H., Zamani, S. A., Mohammadi Kia, R. and Tehrani, M. M. 2015. Guidelines for Integrated Soil Fertility and Nutrition Management of Canola. Soil and Water Research Institute. Sena Publication. [In Persian].

Paknejad, F., Moayeri Por, S., Aghayari, F. and Ilkaei, M. N. 2017. Simulation of maize yield with different levels of nitrogen by using DSSAT model. *Journal of Crop Ecophysiology*, 11(43), pp.503-518. [In Persian]. https://jcep.tabriz.iau.ir/article_536626.html?lang=en

Paymard, P., Bannayan, M. and Haghighi, R. S. 2018. Analysis of the climate change effect on wheat production systems and investigate the potential of management strategies. *Natural Hazards*, 91, pp.1237-1255. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3180-8

Pourabrahimi Fomeni, M. 2018. Using DSSAT model to simulate the effects of climate change on grain yield of some maize cultivars in response to growth and different levels of nitrogen fertilizer. Ph.D. Thesis. Faculty of Agriculture Zabol University, Iran. [In Persian].

Qian, B., Jing, Q., Bélanger, G., Shang, J., Huffman, T., Liu, J. and Hoogenboom, G. 2018. Simulated canola yield responses to climate change and adaptation in Canada. *Agronomy Journal*, 110(1), pp.133-146. https://doi.org/10.2134/agronj2017.02.0076

Ramezani, M. R., Massah Bavani, A. R., Jafari, M. Binesh, A. and Peters, S. 2020. Investigating the leaf area index changes in response to climate change (case study: Kasilian catchment, Iran). *SN Applied Sciences*, 2(3), pp.1-11. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2290-6

Rezaie, B., Hosseinpanahi, F., Siosemardeh, A., Darand, M and Bannayan, M. 2022. Shifting the sowing

date of winter wheat as a strategy for adaptation to climate change in a Mediterranean-type environment. *International Journal of Plant Production*, 16(4), pp.595-610. https://doi.org/10.1007/s42106-022-00202-7

Saseendran, S. A., Nielsen, D. C., Ma, L. and Ahuja, L. R. 2010. Adapting CROPGRO for simulating spring canola growth with both RZWQM2 and DSSAT 4.0. *Agronomy*, 102(6), pp.1606-1621. https://doi.org/10.2134/agronj2010.0277

Tesemma, Z. K., Wei, Y., Western, A. W. and Peel, M. C. 2014. Leaf area index variation for crop, pasture, and tree in response to climatic variation in the Goulburn–Broken catchment, Australia. *Journal of Hydrometeorology*, 15(4), pp.1592-1606. https://doi.org/10.1175/jhm-d-13-0108.1

Thomas, C. L., Alcock, T. D., Graham, N. S., Hayden, R., Matterson, S., Wilson, L., Young, S. D., Dupuy, L. X., White, P. J., Hammond, J. P. and Danku, J. M. C. 2016. Root morphology and seed and leaf ionomic traits in a *Brassica napus* L. diversity panel show wide phenotypic variation and are characteristic of crop habit. *BMC Plant Biology*, 16, pp.1-18. https://doi.org/10.1186/s12870-016-0902-5

Valizadeh, J., Ziaei, S. M. and Mazloumzadeh, S. M. 2014. Assessing climate change impacts on wheat production (a case study). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2), pp.107-115. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.02.002